

Dissolution behavior of main minerals in hydrothermal leaching process of LF refining spent slag

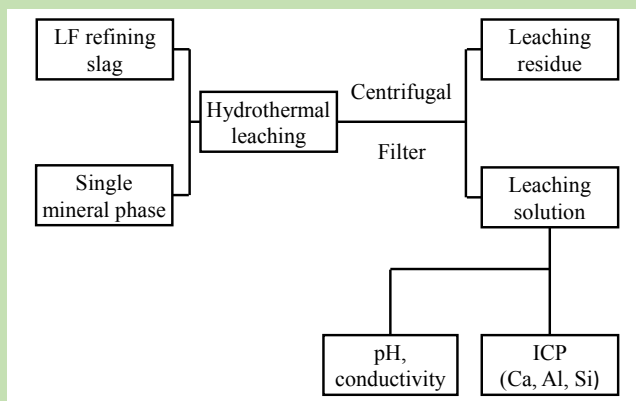
Huanyu HE^{1,2,3}, Weiwei HOU^{1,2,3}, Hongling LIU^{1,2,3}, Yang LI^{1,2,3*}

1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Metallurgical Secondary Resources, Wuhan, Hubei 430081, China

3. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract: Ladle furnace (LF) refining spent slag is a by-product of molten steel refining process. The reutilization of LF refining slag is rare because of the high content of sulfur in the slag. However, the hydrothermal leaching method can effectively reduce the sulfur content in refining slag and the leached slag has high recycling value. As a composite mineral consisting of a variety of single mineral phases, many components of the refined slag dissolve into the solution during the hydrothermal leaching process, forming a multi-component complex



leaching system. It is of great significance to study the dissolution behavior of LF refining slag in hydrothermal leaching process for the recycling of waste residue resources. In order to investigate the dissolution behavior of refining slag, the leaching behavior of LF refining slag and its two main mineral phases ($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ and $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) by hydrothermal leaching treatment were studied and the difference between them was compared. The results showed that the pH value of leaching solution was higher than 12 during the leaching process. With the increase of leaching time, both the concentration of Ca and the conductivity of solution increased subsequently, but the concentration of Al decreased sharply. Furthermore, the concentration of Si with a low concentration of less than 0.1 mg/L remained constant. With the increase of time, in the leaching processing of $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, the pH value of leaching solution was stable with around 11.3, the concentration of Al improved, and the concentration of Ca decreased slightly. Whereas for $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, the leaching solution with low concentration of Si (lower than 0.6 mg/L) mainly contained Ca^{2+} . Overall, the pH value and the concentrations of Al and Si of the leaching solution of the slag were close to those of single mineral phase. The dissolution behavior of LF refining slag in hydrothermal leaching process can be studied by the dissolution behavior of single mineral phase. However, the concentration of Al and Si were lower than that of single mineral phase, indicating that the dissolution of $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ and $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ in slag were restricted by the dissolution of CaO and other components.

Key words: ladle furnace refining spent slag; main minerals; single phase; hydrothermal leaching; dissolution behavior

收稿: 2018-12-04, 修回: 2019-02-22, 网络发表: 2019-03-29, Received: 2018-12-04, Revised: 2019-02-22, Published online: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51604202); 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室青年基金资助项目(编号: 2016QN09); 湖北省自然科学基金资助项目(编号: 2014CFB806)

作者简介: 何环宇(1971-), 女, 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 冶金工程专业, Tel: 15697180906, E-mail: hehuanyu@wust.edu.cn; 李杨, 通讯联系人, Tel: 15527221357, E-mail: liyang2468@wust.edu.cn.

引用格式: 何环宇, 侯巍巍, 刘虹灵, 等. LF 精炼废渣水热浸出过程中主要矿相的溶解行为. 过程工程学报, 2019, 19(4): 735-741.

He H Y, Hou W W, Liu H L, et al. Dissolution behavior of main minerals in hydrothermal leaching process of LF refining spent slag (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(4): 735-741, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218325.

LF 精炼废渣水热浸出过程中主要矿相的溶解行为

何环宇^{1,2,3}, 侯巍巍^{1,2,3}, 刘虹灵^{1,2,3}, 李杨^{1,2,3*}

1. 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081

2. 湖北省冶金二次资源工程技术研究中心, 湖北 武汉 430081

3. 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北 武汉 430081

摘 要: 通过水热浸出实验分别研究了精炼废渣及合成的废渣中 2 种主要单一矿相 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的溶解行为, 并将二者进行对比分析, 探究了 LF 精炼废渣在水热浸出过程中的溶解行为。结果表明, 废渣浸出过程中浸出液的 $\text{pH} > 12$, 且随浸出时间增加, 电导率和 Ca 浓度增加, Al 浓度急剧下降, Si 浓度低于 0.1 mg/L 且保持不变; $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 浸出过程中, 随时间增加, 浸出液 pH 值稳定在约 11.3, 浸出液中 Al 浓度增加, Ca 浓度略微下降。 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 浸出液中主要为 Ca^{2+} , Si 浓度低于 0.6 mg/L ; 废渣与单一矿相浸出过程的 pH 值及 Al , Si 浓度较接近, 可以通过单一矿相的溶解行为研究精炼废渣在水热浸出过程中的溶解行为, 但废渣浸出液的 Al 和 Si 浓度均低于单一矿相, 表明废渣中 CaO 等其它组分溶解抑制了 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 溶解。

关键词: 钢包炉精炼废渣; 主要矿相; 单一矿相; 水热浸出; 溶解行为

中图分类号: TF09 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)04-0735-07

1 前 言

钢包炉(LF)精炼废渣返回冶金过程中再利用是提高企业资源利用率、减轻企业和社会环保压力的有效措施^[1-3]。研究^[4,5]表明, 水热法浸出处理 LF 精炼废渣能有效去除渣中硫元素, 且浸出渣仍具有很高的再利用价值。

组分复杂的渣系在浸出过程中含目标元素的组分和其它组分均会溶解到浸出液中, 如在氧化锌矿碱浸工艺中, 含铝和含铅组分等也会溶解到浸出体系中^[6,7]; 在菱锰矿硫酸浸出体系中, Mn 溶解至浸出液的同时, Fe , Al , Mg 杂质也会随之溶出^[8,9]。水热浸出处理 LF 精炼废渣过程中, 渣中的硫浸出去除的同时, 其它组分(特别是含钙组分)也会进入溶液中, 形成一个多组分的复杂浸出体系, 改变浸出体系的物理化学环境^[10], 同时钙、铝作为有效成分溶解过多也不利于废渣再利用。因此, 研究精炼废渣水热浸出过程中的溶解行为对资源再利用具有重要意义。然而矿渣浸出过程十分复杂, 难以直接对其进行研究。有学者提出通过研究单一矿相的溶解行为模拟矿渣溶解。孙会兰等^[11,12]针对炼铁渣中氧化铝溶出率低的问题, 实验合成了单一矿相模拟高炉渣, 研究其在铝酸钠溶液中的溶出性能及合成矿相中氧化铝的溶出性能。楚维钦等^[13]合成了纯物相硫铝酸钙, 模拟研究粉煤灰、含硫铝土矿等高硫矿物的氧化铝溶出性能。刘志宏等^[14]制备了硅锌矿, 研究硅酸盐类锌矿物在氨浸条件下难以浸出的原因。Engström 等^[15]针对钢渣二次利用过程中金属的浸出问题, 通过测定钢渣中 6 种常见矿相的溶解度, 模拟研究不同矿相组成的钢渣的溶解情

况。Strandkvist 等^[16]为研究钢渣中金属浸出问题, 合成了不同 FeO 含量的镁橄榄石, 研究其在溶液中的溶解度。冶金废渣是一种由多种基础单一矿相组成的复合矿物^[5], 以上工作均是简单地用单一矿相的溶解行为直接代替复杂矿渣的溶解, 是否能真实反映组成复杂的矿渣的溶解行为还需进一步考察。

为研究精炼废渣在水热浸出过程中的溶解行为, 本工作在对废渣进行水热浸出实验的基础上, 合成了废渣中的主要矿相, 研究单一矿相的浸出行为, 将废渣和合成矿相的浸出行为对比, 研究废渣在水热浸出过程中的溶解行为, 为研究复杂的多组分废渣的溶解提供方法。

2 实 验

2.1 实验原料

合成废渣中主要矿相的原料有 CaCO_3 (天津市博迪化工有限公司), Al_2O_3 和 SiO_2 (天津市凯通化学试剂有限公司), 均为分析纯。

精炼废渣取自某钢厂, 其化学成分和主要物相构成分别如表 1 和图 1 所示。由表可以看出, 废渣中 CaO 含量很高, 接近 60%, Al_2O_3 和 SiO_2 含量均约为 15%, 部分 CaO 以游离形式存在。由图可以看出, 废渣的主要物相为 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (简称为 C12A7), $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (简称为 C2S), 渣中的硫以含硫物相 $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaS}$ 形式存在。

表 1 精炼废渣的化学成分

Table 1 Chemical compositions of refining slag					
Component	CaO	Al_2O_3	SiO_2	FeO	S
Content/wt%	57.85	17.05	16.52	1.44	1.40

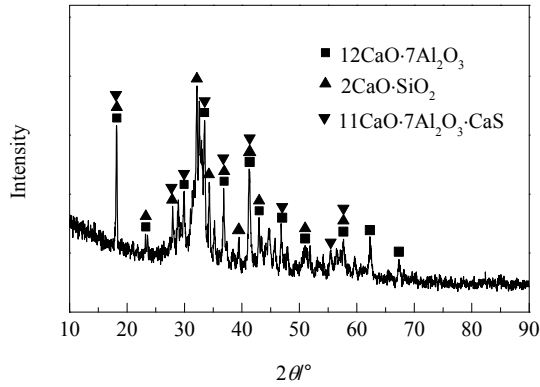


图 1 精炼废渣的 XRD 谱
Fig.1 XRD pattern of refining slag

2.2 实验设备

2 种主要单一矿相 C12A7 和 C2S 用 SKW₁₆-XYL 型高温管式电阻炉(额定温度 1600℃, 西安云汉高温炉业有限公司)合成。水热浸出设备为 KLJX-8A 型均相反应器(工作温度≤300℃, 转速 0~70 r/min, 烟台科立化工设备有限公司)。高温管式电阻炉和均相反应器示意图

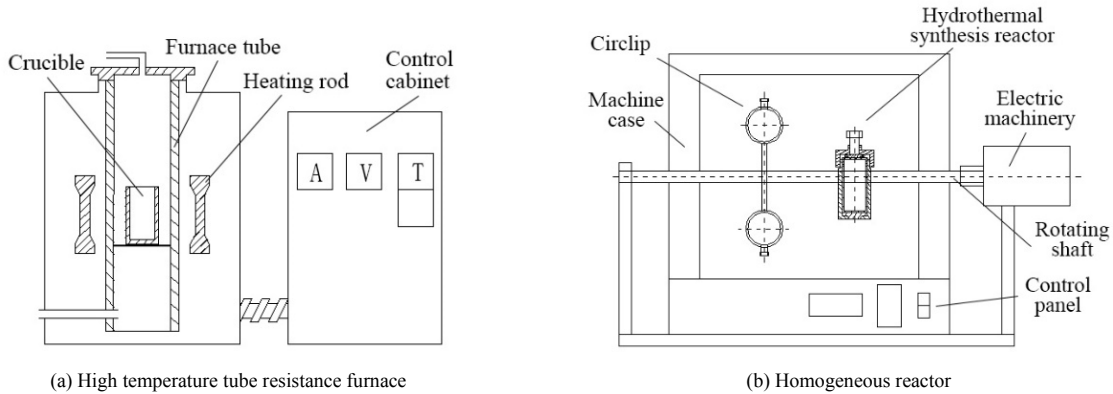


图 2 实验设备示意图
Fig.2 Schematic diagram of experimental equipments

如图 2 所示。TDL80-2B 型离心机(最高转速 4000 r/min, 上海安亭科学仪器厂), 滤膜($\phi=0.45\text{ }\mu\text{m}$)。采用 X 射线衍射仪(XRD, 荷兰帕纳科公司)检测合成矿相的物相组成。

2.3 实验方法

2.3.1 单一矿相的制备

采用高温烧结法合成 C12A7 和 C2S 两种矿物, 将药品按化学计量比准确称量并混合均匀, 用硅钼电阻炉高温煅烧 8 h 后随炉缓冷。1250℃ 以上 C2S 就能稳定存在, 同时 C12A7 能大量生成, 因此设定实验温度为 1400℃^[17]。合成反应参数见表 2, 合成矿物的形态及其 XRD 衍射谱如图 3 和 4 所示。

表 2 矿相合成实验参数				
Table 2 Parameters of minerals synthesis				
Synthetic mineral	Chemical composition	Manufacturing temperature/℃	Calcining time/h	Cooling
C12A7	CaCO ₃ , Al ₂ O ₃	1400	8	Slow
C2S	CaCO ₃ , SiO ₂	1400	8	Slow



图 3 合成矿物的形态
Fig.3 The form of synthetic minerals

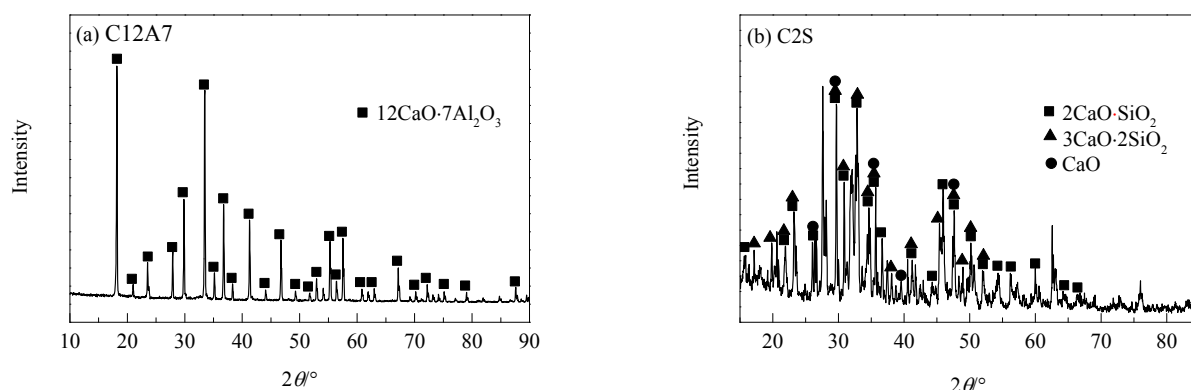


图 4 合成矿物的 XRD 谱
Fig.4 XRD patterns of synthetic minerals

由图 3 可以看出,合成的 C12A7 为均匀的结晶块, C2S 由掺杂大量粉末的结晶体构成。由图 4 可知,合成的 C12A7 为单一矿相, C2S 为非单一矿相,除 C2S 外还有较多 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (简称为 C3S2) 及未反应的 CaO。这主要是因为 C2S 的熔点远高于合成温度,在 1400°C 下主要生成 α' -C2S, C3S 和 C3S2, 随温度降低, C3S 分解为 CaO 和 α' -C2S, 随冷却进行 C2S 晶型转变为 γ -C2S, 同时体积膨胀造成矿物粉化^[18], 因此最后产物为 γ -C2S, C3S2 和 CaO。合成的 C2S 中 CaO 含量很高, 在 XRD 谱中呈明显的衍射峰, 甚至比精炼废渣中游离的 CaO 含量还高。

2.3.2 水热浸出实验

将 LF 精炼废渣和合成的 2 种单一矿物充分研磨, 按一定的固液比 g/mL 装入反应釜, 放入均相反应器中水热浸出, 实验参数见表 3, 每次实验 5 min。实验结束后将反应釜从均相反应器中取出水冷, 离心、过滤分离浸出液, 测定滤液的 pH 值和电导率, 用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, 美国 Thermo Elemental 公司) 分析浸出液中 Ca, Al 和 Si 的浓度。

表 3 水热浸出实验参数

Table 3 Parameters of hydrothermal leaching experiment			
Sample	Leaching temperature/ $^\circ\text{C}$	Leaching time/min	Solid-liquid ratio, S/L/(g/mL)
Refining slag	150	10~35	1:3, 1:7
C12A7	150	10~35	1:7
C2S	150	10~35	1:7

3 结果与讨论

3.1 废渣在水热浸出过程中的行为

LF 精炼废渣的水热浸出特性如图 5 所示。可以看出, 浸出 10 min 时浸出液 pH \approx 12, 浸出时间延长, 2 组

浸出液的 pH 值均略升高, 其中固液比为 1:3 g/mL 时浸出液的 pH 比 1:7 g/mL 时高。不同固液比下浸出液的电导率十分接近, 且均随浸出时间延长逐渐增加, 但浸出 35 min 时, 2 组实验的电导率又均有所下降。随浸出时间增加, 浸出液中 Ca 浓度快速增加, 达 600~700 mg/L, 浸出 35 min 时, 2 组浸出液的 Ca 浓度均有所下降; Al 浓度在 10 min 时均较高, 分别超过 40 和 100 mg/L, 但浸出 15 min 后急剧下降, 最后保持在约 2 mg/L; Si 浓度在浸出过程中始终保持在约 0.05~0.08 mg/L 的低水平, 表明废渣中的 Si 在水热浸出过程中基本不被浸出。

3.2 合成矿相水热浸出过程中的行为

2 种合成的单一矿相的水热浸出行为如图 6 和 7 所示。由图 6 可以看出, C12A7 浸出过程中, 随浸出时间增加, 浸出液 pH 值先降低后升高, 浸出 30 min 时达最大值 11.36, 35 min 时略降低。浸出液的电导率在浸出 25 min 后快速升高, 表明溶液中带离子浓度增加。浸出过程中 Al 浓度一直大于 Ca 浓度, 且 Al 浓度随浸出时间延长呈波动增加, Ca 浓度先呈波动减小后增加, 25 min 时达最小值 170.6 mg/L, 35 min 时为 255.6 mg/L。

由图 7 可知, C2S 在浸出过程中, Si 浓度很低(不足 1 mg/L), 这是因为 γ -C2S 水化活性极低^[19], 且浸出后 Si 形成了不溶于水的 CaSiO_3 。随浸出时间增加, 浸出液中 Ca 浓度逐渐下降, 由 10 min 时的 758.2 mg/L 降至 35 min 时的 566.9 mg/L。浸出液的 pH 值由 10 min 时的 11.6 降至 35 min 时的 11.3, 与浸出液中 Ca 浓度变化趋势一致, 表明均相反应器中水热浸出反应充分, 浸出 10 min 时溶液中的 Ca 已达饱和, 已溶解的 Ca^{2+} 与溶液中的 OH^- 形成沉淀, Ca 浓度降低, 同时浸出液的 pH 值也降低。浸出液的电导率与 Ca 浓度变化趋势完全一致, 可知 C2S 在浸出液中溶解的离子主要为 Ca^{2+} 。

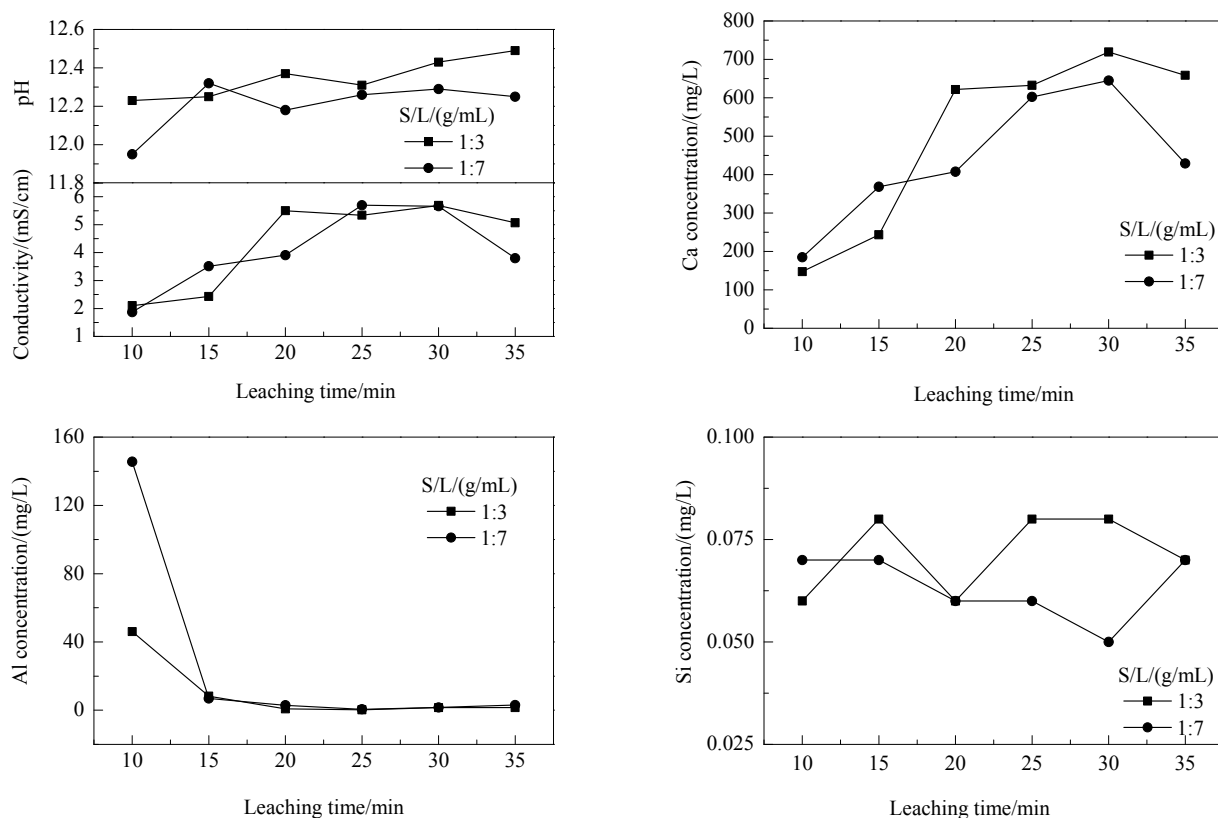


图5 不同固液比下 LF 精炼废渣的水热浸出行为

Fig.5 Hydrothermal leaching behavior of LF refining slag with different solid-liquid ratios

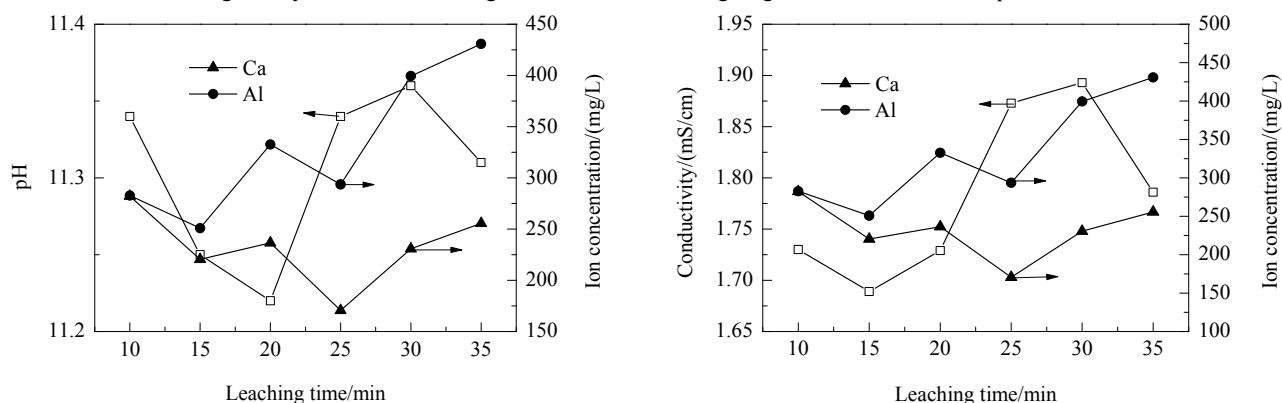


图6 C12A7 水热浸出的溶解特性

Fig.6 Dissolution characteristics of C12A7

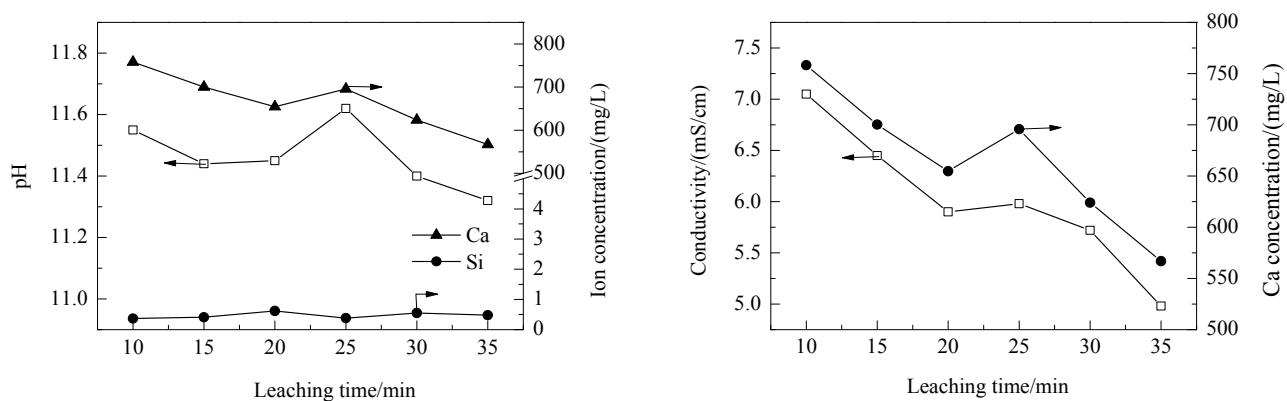


图7 C2S 水热浸出的溶解特性

Fig.7 Dissolution characteristics of C2S

3.3 废渣浸出与合成矿相水热浸出行为比较

图 8 为 LF 精炼废渣与 C12A7 水热浸出过程溶解特性的比较。可以看出, 废渣浸出过程中浸出液的 pH 随浸出时间增加而增加, 最后稳定在约 12.2; C12A7 浸出液的 pH 约为 11.3, 这与废渣中含大量游离 CaO 且在浸出过程中不断溶解有关。与 C12A7 相比, 废渣浸出液中

Ca 浓度明显更高, Al 浓度更低, 这是因为在浸出开始就有大量 C12A7 溶解出 Ca^{2+} 和 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, 且随浸出时间延长, 溶解进一步进行, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 浓度增加, 而部分 Ca^{2+} 与 OH^- 生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 沉淀, Ca 浓度减小。浸出 10~15 min 时废渣浸出液中 Al 浓度迅速减小, 这是因为溶液中的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与过量的 Ca^{2+} 生成铝酸钙类水化物^[20]。

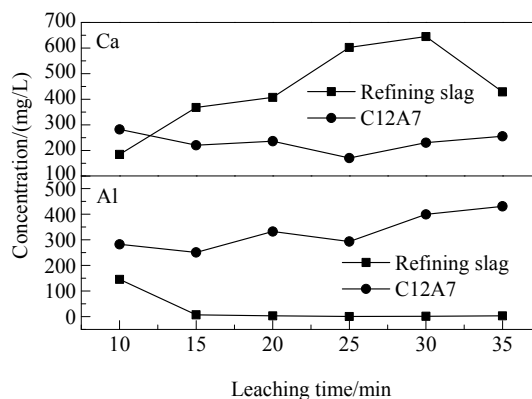
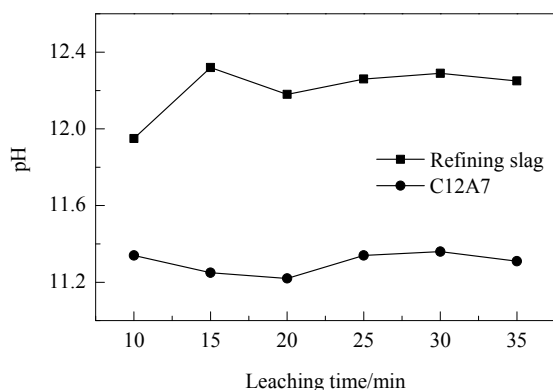


图 8 LF 精炼废渣与 C12A7 浸出结果的对比

Fig.8 Comparison of leaching results between LF refining slag and C12A7

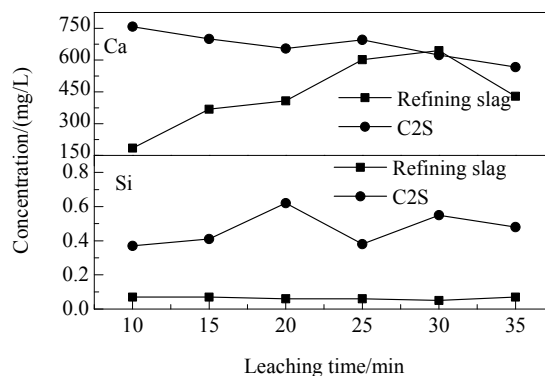
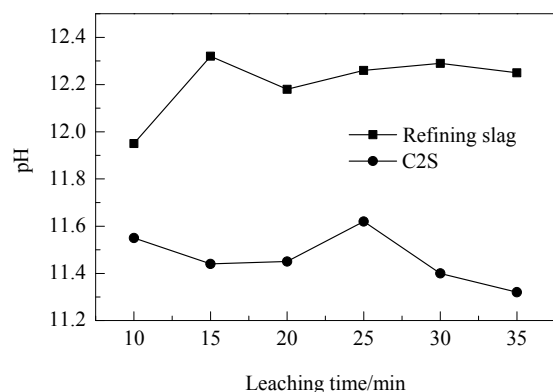


图 9 LF 精炼废渣与 C2S 浸出结果的对比

Fig.9 Comparison of leaching results between LF refining slag and C2S

图 9 为 LF 精炼废渣与 C2S 水热浸出过程溶解特性的比较。可以看出, C2S 浸出液的 pH 值小于废渣浸出液, 随时间增加略下降但基本维持在约 11.4。与精炼废渣相比, C2S 浸出液中 Si 浓度相差不大, 而 Ca 浓度高很多, 这是因为 C2S 不是单一矿相, 在水热浸出过程中有 CaO 大量溶解, 造成浸出液中 Ca 浓度较高, 而硅酸钙类溶解量很小, 因此 Si 浓度很低。

比较 LF 精炼废渣与单一矿相水热浸出过程可以看出, 浸出开始时, 废渣中的 C12A7 矿相快速溶解; 随时间增加, 浸出液中 Ca 浓度增加, 废渣中的 C12A7 矿相溶解受到抑制, 且已溶解的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 与过量的 Ca^{2+} 生成铝酸钙类水化物, Al 浓度减小; 废渣浸出液中 Si 浓度比 C2S 浸出液低, 表明 C2S 的溶解受到抑制。

4 结 论

通过水热浸出实验对比了精炼废渣及合成的 2 种单一矿相 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的溶解行为, 得出以下结论:

(1) 水热法浸出精炼废渣过程中, 浸出液的 pH 值和电导率随浸出时间延长而增加, 浸出液中的 Ca 浓度增加, Al 浓度迅速减小, Si 浓度很低且基本保持稳定。固液比为 1:3 g/mL 的浸出液的 pH、电导率和 Ca 浓度略高于固液比为 1:7 g/mL 的浸出液, Al 浓度和 Si 浓度基本相同。

(2) $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 浸出液的 pH 值随浸出时间波动, 但基本稳定在约 11.3, 电导率随浸出时间延长而增加,

溶液中的 Al 浓度增加, Ca 浓度略微下降。 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 浸出迅速, 浸出液中主要为 Ca^{2+} , Si 浓度很低, 浸出液的 pH 和电导率变化与 Ca 浓度变化趋势一致。

(3) 与精炼废渣相比, 合成的单一矿相浸出过程中 pH 值及 Al 和 Si 浓度较接近, 表明通过单一矿相的溶解行为研究精炼废渣在水热浸出过程中的溶解行为是可行的。但精炼废渣的 pH 及 Al 和 Si 浓度有一定偏差, 特别是 Al 和 Si 浓度偏低, 表明废渣水热浸出过程中 2 中主要矿相的溶解受到抑制, 这是由于还存在其它组分的溶解。

参考文献

- [1] 刘航航, 刘朝阳, 邵伟. LF 精炼废渣资源循环利用综述 [J]. 炼钢, 2015, 31(2): 73–78.
Liu H H, Liu Z Y, Shao W. The resource recycling of LF refining slag [J]. *Steelmaking*, 2015, 31(2): 73–78.
- [2] Wang Y, Yang S F, Li J S, et al. Cyclic use of ladle furnace refining slag for desulfurization [J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2017, 3(2): 274–279.
- [3] 王维, 胡尚雨. LF 冷态渣用于脱硫的研究 [J]. 炼钢, 2011, 27(2): 48–51.
Wang W, Hu S Y. Study on using LF cold slag for desulphurization [J]. *Steelmaking*, 2011, 27(2): 48–51.
- [4] Uehara N, Fujimoto K, Hanada K, et al. Fabrication of equipments treating iron and steel slags with highly-pressurized hot water and investigation of leaching of constituents from the slags [J]. *Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 2014, 100(8): 1014–1020.
- [5] 何环宇, 王杰奇, 陈振红, 等. 水热浸出 LF 精炼废渣物化性能研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(1): 7–10.
He H Y, Wang J Q, Chen Z H, et al. Physicochemical properties of LF refining spent slag after hydrothermal leaching [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2016, 39(1): 7–10.
- [6] Zhao Y C, Robert S. Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn–Pb ores [J]. *Hydrometallurgy*, 2000, 56: 237–249.
- [7] Chen A L, Zhao Z W, Jia X J, et al. Alkaline leaching Zn and its concomitant metals from refractory hemimorphite zinc oxide ore [J]. *Hydrometallurgy*, 2009, 97(3/4): 228–232.
- [8] 谢子楠, 杨凤. 菱锰矿浸出液中杂质离子的分步净化试验研究 [J]. 湿法冶金, 2017, 36(2): 123–127.
Xie Z N, Yang F. Removal of impurity ions from acidic leaching liquor of rhodochrosite [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2017, 36(2): 123–127.
- [9] 包玺琳, 李国栋, 巩明辉. 某低品位菱锰矿硫酸浸出—金属离子杂质脱除试验研究 [J]. 金属矿山, 2017, 498(12): 54–57.
Bao X L, Li G D, Gong M H. Research of metal ions impurities removing and sulfuric acid leach of a low-grade rhodochrosite [J]. *Metal Mine*, 2017, 498(12): 54–57.
- [10] 何环宇, 王杰奇, 张华, 等. LF 脱硫废渣水热浸出多组分溶解行为 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(1): 26–31.
He H Y, Wang J Q, Zhang H, et al. Dissolution of multicomponents during hydrothermal leaching of LF desulfurization slag [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(1): 26–31.
- [11] 孙会兰, 涂赣峰, 毕诗文, 等. 七铝十二钙的合成及其在高碳钠铝酸钠溶液中的溶出性能 [J]. 轻金属, 2007, (11): 17–19.
Sun H L, Tu G F, Bi S W, et al. Synthesis of C_{12}A_7 and its leaching property in sodium aluminate solution with high- $\text{Na}_2\text{O}_\text{C}$ [J]. *Light Metals*, 2007, (11): 17–19.
- [12] 孙会兰, 于海燕, 齐铭, 等. $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 混合物相的合成和溶出性能研究 [J]. 轻金属, 2009, (1): 9–12.
Sun H L, Yu H Y, Qi M, et al. Synthesis and leaching properties of $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ mixture [J]. *Light Metals*, 2009, (1): 9–12.
- [13] 楚维钦, 张学政, 马东东, 等. 硫铝酸钙的氧化铝溶出性能 [J]. 化工学报, 2017, 68(1): 460–466.
Chu W Q, Zhang X Z, Ma D D, et al. Alumina leaching properties of calcium sulphoaluminate [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(1): 460–466.
- [14] 刘志宏, 曹志阁, 刘智勇, 等. 硅铈矿在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{--NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ 体系中高液固比下的浸出动力学 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 418–423.
Liu Z H, Cao Z Y, Liu Z Y, et al. Leaching kinetics of willemite in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{--NH}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at higher mass ratio of liquid to solid [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(2): 418–423.
- [15] Engström F, Adolfsson D, Samuelsson C, et al. A study of the solubility of pure slag minerals [J]. *Minerals Engineering*, 2013, 41: 462.
- [16] Strandkvist I, Sandström Å, Engström F. Effect of FeO/MgO ratio on dissolution and leaching of magnesio-wüstite [J]. *Steel Research International*, 2017, 88(6): 1–7.
- [17] 黄希祐. 钢铁冶金原理 [M]. 第 4 版. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 212–215.
Huang X H. Principles of steel metallurgy [M]. 4th Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 212–215.
- [18] 汪智勇, 王敏, 文寨军, 等. 硅酸二钙及其为主要矿物的低钙水泥的研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(1): 74–75.
Wang Z Y, Wang M, Wen Z J, et al. Progress on study of dicalcium silicate and low calcium cement with dicalcium silicate as a main mineral composition [J]. *Materials Review*, 2016, 30(1): 74–75.
- [19] 张雄. 介质对 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 水化的影响 [J]. 上海建材学院学报, 1989, 2(4): 323–328.
Zhang X. Influence of media upon the hydration of $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ [J]. *Journal of Shanghai Institute of Building Materials*, 1989, 2(4): 323–328.
- [20] 严生, 蔡安兰, 周际东. $\text{C}_2\text{S}\text{--}\text{C}_{12}\text{A}_7\text{--}\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{H}_2\text{O}$ 系统水化机理 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(4): 522–523.
Yan S, Cai A L, Zhou J D. Hydration mechanism of $\text{C}_2\text{S}\text{--}\text{C}_{12}\text{A}_7\text{--}\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{H}_2\text{O}$ system [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(4): 522–523.